



VNiVERSiDAD D SALAMANCA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Memoria de resultados del proyecto de
innovación ID2017/181

Diseño y construcción mediante impresión 3D
de modelos didácticos para la docencia de
robots paralelos



Béjar, 15 de julio de 2018



Índice

1. Introducción	1
1.1. Objetivos del proyecto	2
2. Desarrollo del proyecto	2
2.1. Descripción de las actividades realizadas	2
2.2. Proceso de evaluación	9
3. Resultados	9
4. Conclusiones	9



1. Introducción

Durante los últimos años impartiendo la docencia de las asignaturas “Mecánica de Robots” (Grado en Ingeniería Mecánica) y “Sistemas Integrados de Fabricación” (Máster Universitario en Ingeniería Industrial), en las que se aborda el análisis de posición, cinemático y dinámico de robots industriales, se ha observado que los estudiantes presentan una serie de dificultades relacionadas con la visualización espacial de las posiciones y movimientos complejos que realizan estos sistemas mecánicos. En esencia estas dificultades se pueden resumir en:

- Dificultad para visualizar la orientación del elemento terminal (o pinza) del robot que realiza una tarea en un proceso productivo.
- Dificultad para visualizar las diversas configuraciones (conjunto de giros o desplazamientos de los pares cinemáticos de un robot) que surgen al resolver el problema de posición directo (PPD) e inverso (PPI).
- Dificultad para visualizar la relación existente entre las coordenadas articulares (conjunto de giros o desplazamientos de los pares cinemáticos de un robot) y la posición y orientación del elemento terminal. Esta dificultad se manifiesta particularmente en el análisis de las posiciones límite que determinan el espacio de trabajo del robot.
- Inquietud para llevar a la realidad los conocimientos teórico-prácticos y técnicas de diseño adquiridos en diversas asignaturas.

La principal innovación que ha supuesto el desarrollo de este proyecto consiste en la creación mediante impresión 3D de un modelo didáctico de un robot paralelo que permite visualizar de forma directa la relación que existe entre las posiciones de los diferentes eslabones del robot y la posición/orientación final de la plataforma móvil. De esta forma, se pone en contacto a los estudiantes de ingeniería con dos tecnologías actualmente en auge: los robots paralelos tipo Delta con una implantación creciente en diversas empresas del sector industrial y la fabricación aditiva (impresión 3D) para la creación de prototipos en tiempos muy reducidos.

La experiencia del equipo que forma parte de este proyecto en el desarrollo de proyectos de innovación financiados por la Universidad de Salamanca, ha servido de base para el desarrollo de las nuevas aplicaciones didácticas. De este modo, la utilización de programas informáticos CAD/CAE (ampliamente utilizados en la actualidad en la industria), como Autodesk Inventor, ha servido no sólo para diseñar y modelar los diferentes componentes que forman un robot industrial Delta 3RUU sino también como punto de partida para crear las piezas del modelo didáctico imprimidas posteriormente con la impresora 3D BQ Witbox Go que ha sido adquirida gracias a la financiación recibida en este proyecto y a la cofinanciación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Salamanca.

Este proyecto ha supuesto un paso adelante en la utilización de estos sistemas incluyendo la fabricación (CAM) por medio de la impresión 3D como una forma rápida y económica para la creación de prototipos y, en este caso en concreto, de un modelo didáctico de un robot industrial.

La puesta en marcha de las actividades docentes desarrolladas en este proyecto durante la impartición de la asignatura “Mecánica de Robots” (1^{er} semestre del curso 2018-2019) servirá para estimar en qué medida se mejora la visualización espacial y exigirán a los estudiantes poner en práctica los conocimientos adquiridos en las clases de teoría utilizando técnicas de autoaprendizaje, aprendizaje basado en problemas o aprendizaje basado en proyectos.

1.1. Objetivos del proyecto

Para resolver las dificultades expuestas anteriormente, se plantearon los siguientes objetivos:

- 1) Mejorar la comprensión de los conceptos teóricos y procedimientos de análisis mecánico de robots paralelos tipo Delta mediante la utilización de un modelo didáctico 3D. Para ello, se ha hecho uso de:
 - i) Material didáctico específicamente desarrollado con este fin en el ámbito del proyecto: Un modelo didáctico 3D y un modelo virtual de un robot paralelo tipo Delta ampliamente utilizado en el sector industrial.
 - ii) Prácticas y actividades basadas en la utilización de modelos didácticos 3D que permitirán a los estudiantes visualizar de una forma clara e intuitiva tanto la posición como la orientación del elemento terminal o pinza de un robot en diferentes condiciones de trabajo/funcionamiento.
- 2) Acercar al estudiante al empleo de diversas herramientas informáticas CAD/CAE/CAM propias de la ingeniería actual.
- 3) Conseguir una participación más activa del estudiante, aumentando su motivación y mejorando el proceso de aprendizaje.

A partir de los resultados de las actividades docentes desarrolladas dentro del ámbito de este proyecto de innovación docente se puede considerar que la consecución de los objetivos propuestos ha sido la siguiente:

En cuanto al primer objetivo, se ha alcanzado plenamente, puesto que se ha diseñado, modelado y creado un modelo didáctico de un robot Delta 3RUU así como diversas actividades prácticas que facilitan la visualización espacial y la comprensión de los conceptos desarrollados en el ámbito de las asignaturas.

En cuanto al segundo objetivo planteado, también consideramos que se ha alcanzado puesto que en el desarrollo de las actividades propuestas los estudiantes tendrán que utilizar diversas herramientas informáticas CAD/CAE/CAM para poder llevarlas a cabo.

Teniendo en cuenta que las asignaturas en las que se aplicarán los resultados de este proyecto se imparten en el primer semestre, no será posible determinar el grado de cumplimiento del tercer objetivo planteado hasta el final del primer semestre del curso 2018-2019, en el que se pondrán en marcha las prácticas diseñadas.

2. Desarrollo del proyecto

2.1. Descripción de las actividades realizadas

Para la consecución de los objetivos propuestos, se realizaron las siguientes actuaciones ordenadas por fases:

Fase I) Recopilación de información sobre los modelos de robots paralelos tipo Delta comerciales de uso más extendido en la industria actual. La información esencial es: las dimensiones de los eslabones, espacio de trabajo, tipo de pares cinemáticos, rangos de giro/desplazamiento de los pares, etc.

Para realizar esta fase, inicialmente se buscó en las páginas webs de diversos fabricantes de robots industriales (ABB, FANUC, ADEPT, etc) modelos comerciales de robots industriales con una configuración paralela tipo Delta. Entre ellos se seleccionó el robot ABB IRB 360 que ha sido utilizado como referencia para crear el modelo didáctico del robot. De la web de este fabricante se obtuvo información sobre diversos datos técnicos del robot (dimensiones, distancias entre ejes

y espacio de trabajo) y se analizaron las múltiples aplicaciones industriales de este robot en la actualidad (Fig. 1).

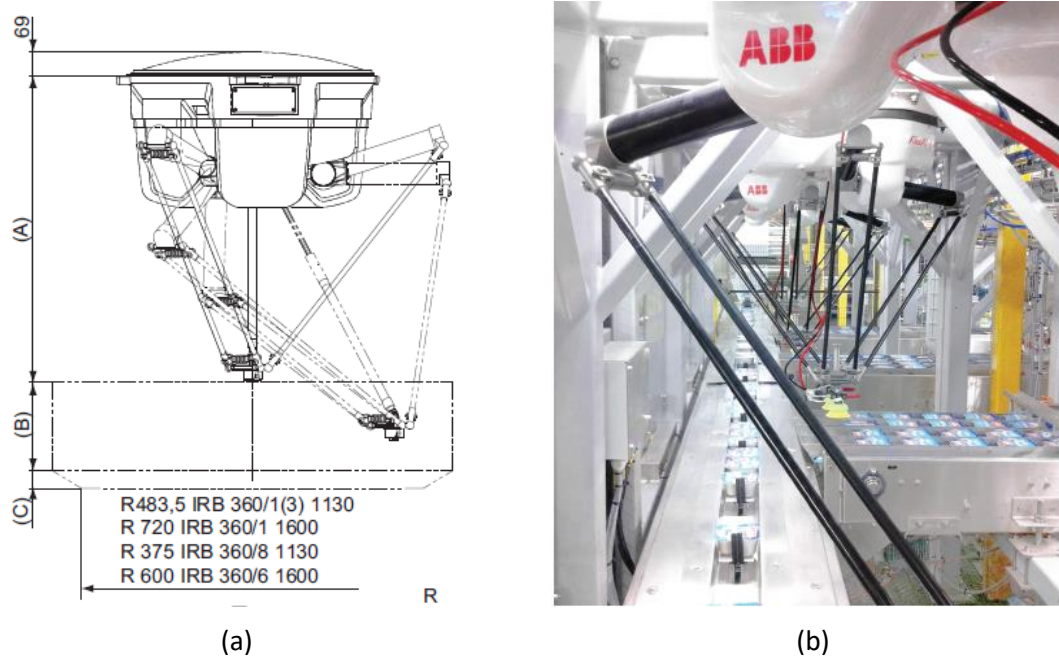


Fig. 1. Robot ABB IRB360: (a) especificaciones técnicas, dimensiones, espacio de trabajo y (b) aplicación industrial del robot en labores de manipulación. (cortesía: ABB)

Fase II) Adaptar el modelo real del robot a un modelo didáctico, simplificado la geometría y las dimensiones (modelo a escala), etc. manteniendo los grados de libertad y la forma del espacio de trabajo.

En esta fase, se redujeron las dimensiones de las barras que forman el robot (Fig. 2) teniendo en cuenta la limitación impuesta por el volumen máximo de impresión de la impresora BQ Witbox Go (14x14x14 cm). De igual modo, se decidió sustituir las juntas universales por juntas esféricas en las uniones del brazo inferior con el brazo superior y con la plataforma móvil. Una vez ajustadas las dimensiones del modelo didáctico del robot, se diseñaron las diferentes barras tal como se comenta en el desarrollo de la siguiente fase del proyecto.

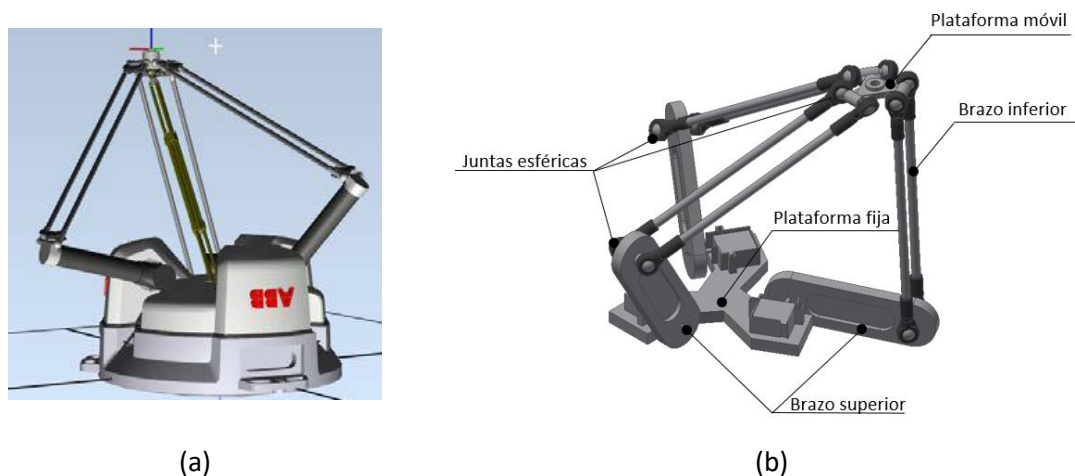


Fig. 2. Robot ABB IRB360: (a) modelo real (cortesía: ABB) y (b) modelo simplificado del robot Delta creado con Autodesk Inventor.

Fase III) Modelar y simular mediante el programa CAD/CAE Autodesk Inventor cada uno de los eslabones que forman la cadena cinemática del robot y ensamblarlos para construir un modelo virtual del robot paralelo haciendo uso de una licencia educativa de dicho programa accesible para toda la comunidad universitaria (estudiantes y profesorado).

Para realizar esta fase se diseñaron y modelaron con Autodesk Inventor los siguientes eslabones del robot de la forma mostrada en la Fig. 3 a partir de las dimensiones adaptadas en la fase anterior. En esta fase se contó con la ayuda inestimable del estudiante David Plata Martín, que ha realizado su TFG en el área de Ingeniería Mecánica de la ETS de Ingeniería Industrial.

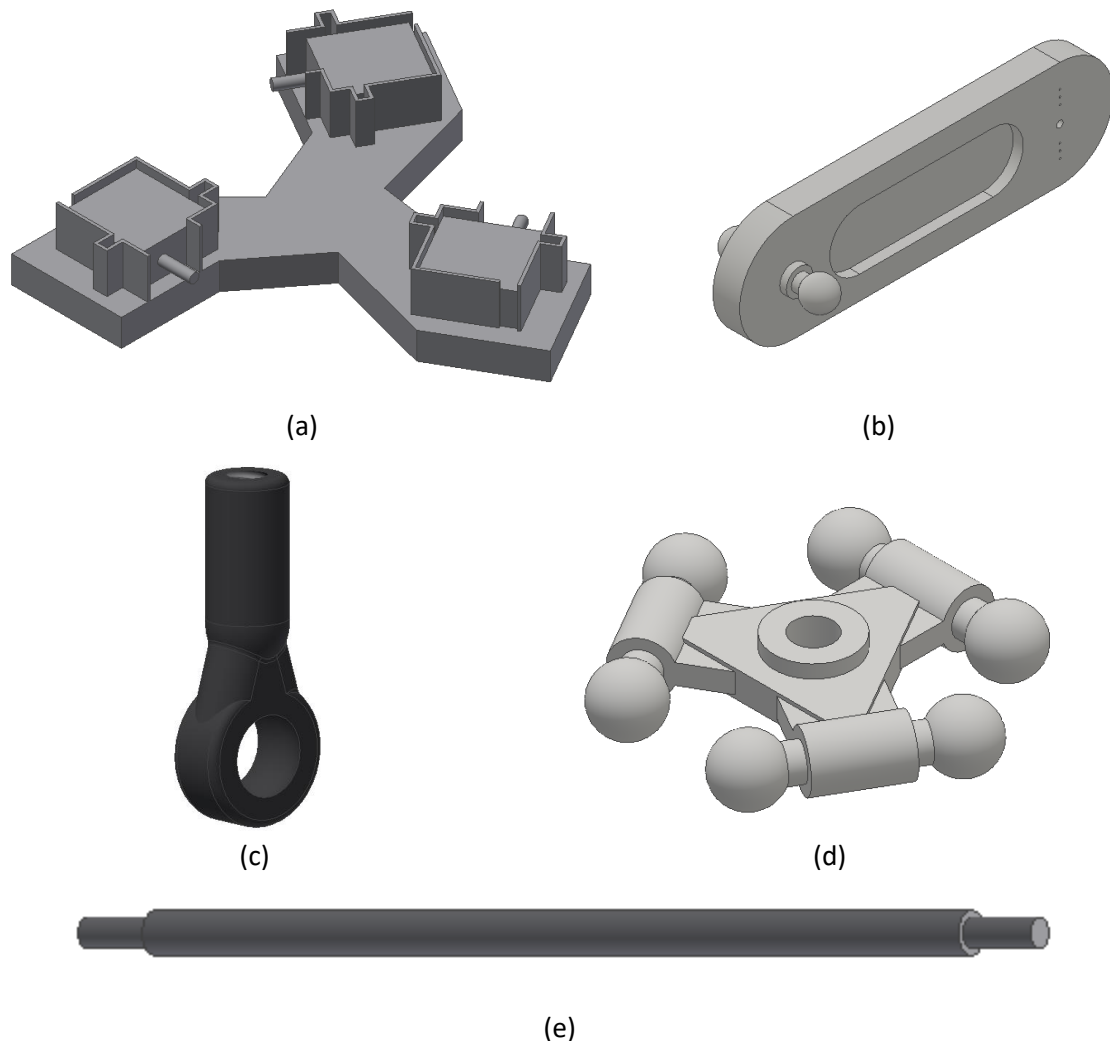


Fig. 3. Piezas del modelo didáctico del Robot Delta: (a) plataforma fija, (b) brazo superior, (c) unión esférica, (d) brazo inferior y (e) plataforma móvil.

Fase IV) Cálculos teóricos del problema de posición directo (PPD) e inverso (PPI) del robot seleccionado para obtener sus ecuaciones cinemáticas.

Fase V) Validación de los resultados obtenidos en los cálculos teóricos y simulaciones numéricas con Autodesk Inventor.

Partiendo de las dimensiones del modelo didáctico del robot se aplicó el método geométrico para resolver tanto el PPD como el PPI. Posteriormente, con el módulo simulación dinámica de Inventor se impuso el giro correspondiente a las tres variables articulares (giro de los tres brazos superiores, Fig. 2b) y se determinó la posición del elemento terminal en diferentes casos: (i) las

tres variables articulares iguales (Fig. 4a) y (ii) tres variables articulares distintas (Fig. 4b). Los valores obtenidos en la simulación se compararon con los obtenidos de las ecuaciones cinemáticas del manipulador encontrando en ambos casos resultados similares.

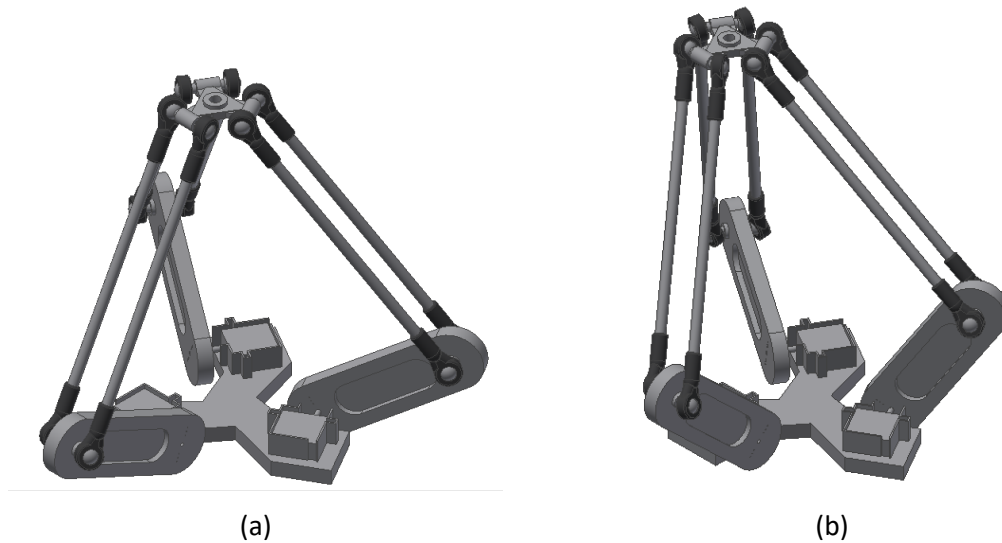


Fig. 4. Simulación con el modelo virtual del robot Delta del PPD: (a) tres variables articulares iguales y (b) tres variables articulares distintas.

Fase VI) Impresión de los modelos 3D creados con Autodesk Inventor en la fase III.

En esta fase las piezas diseñadas y modeladas con Autodesk Inventor en la fase anterior se crearon con la impresora BQ Witbox GO (Fig. 5) adquirida en parte con el dinero asignado a este proyecto. El material elegido para la impresión es ácido poliláctico (PLA). Para poder imprimir la unión esférica entre el brazo superior y el brazo inferior y entre el brazo inferior y la plataforma móvil (Fig. 2b) se decidió imprimir estas piezas directamente con las juntas esféricas ya ensambladas tal como se muestra en la Fig. 6. De este modo la unión crítica del ensamblaje se obtiene directamente mediante un cierre de forma. El tiempo estimado de impresión de todas las piezas ha sido de 19 horas. Una vez imprimidas las piezas, se ensamblaron las varillas del brazo inferior (Fig. 3e) en las juntas esféricas del brazo superior y de la plataforma móvil (Fig. 7a) y se unieron los brazos superiores a la plataforma fija mediante tornillos dando lugar al modelo didáctico 3D del robot mostrado en la Fig. 7b.



Fig. 5. (a) Impresora BQ Witbox Go e (b) impresión del brazo superior con la impresora 3D BQ Witbox Go.

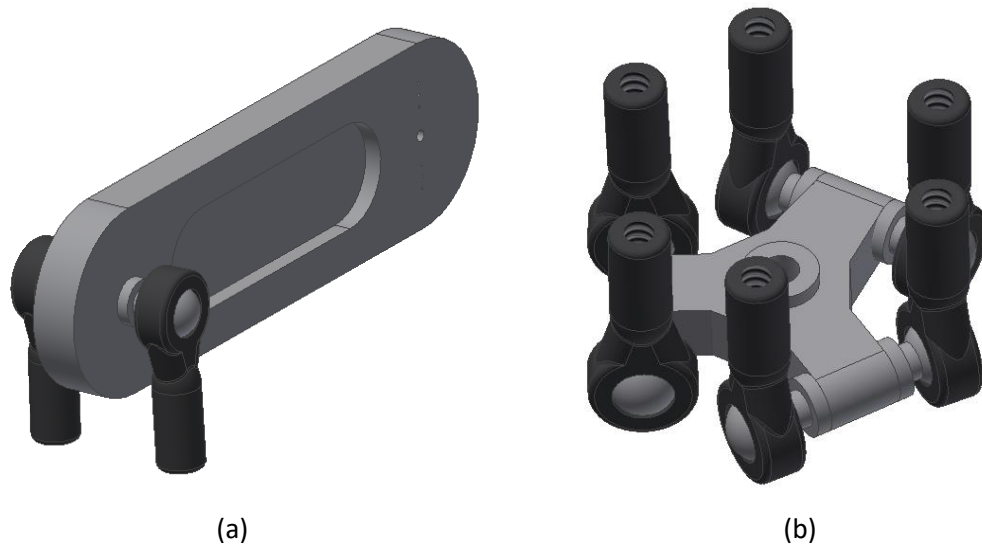


Fig. 6. Modificación de las piezas del modelo del robot Delta para ser imprimidas:
(a) brazo superior y (b) plataforma móvil.

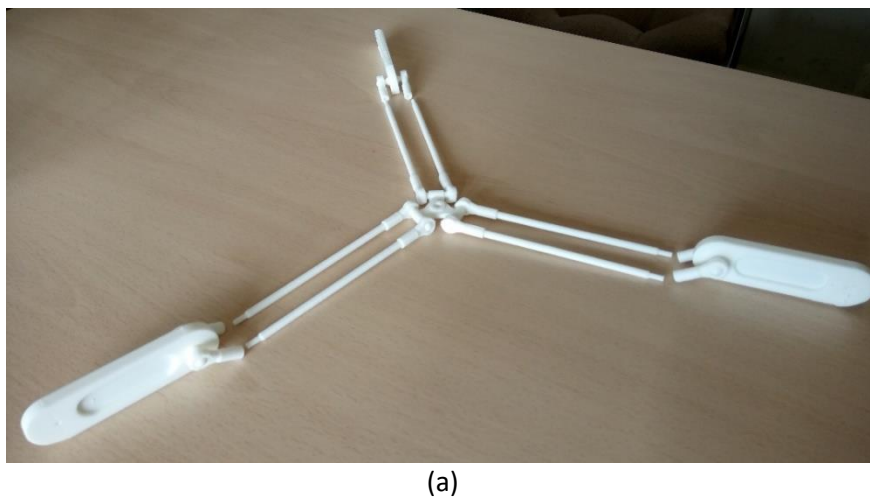


Fig. 7. Modelo didáctico del Robot Delta: (a) Ensamblaje de las varillas de los brazos inferiores y brazos superiores y (b) modelo ensamblado.

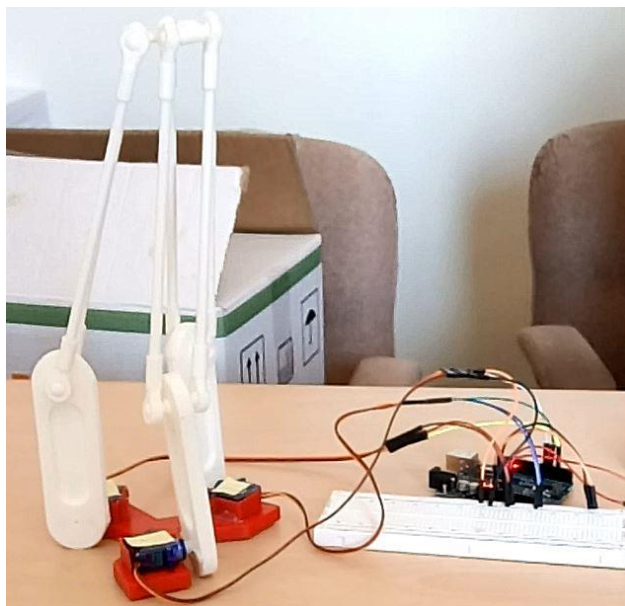
Fase VII) Diseño de actividades docentes utilizando los modelos de robots didácticos y las metodologías de autoaprendizaje y aprendizaje basado en problemas.

El fin último de este proyecto consiste en facilitar a los estudiantes la adquisición de las competencias específicas y transversales propias de las asignaturas “Mecánica de Robots” en el Grado en Ingeniería Mecánica y “Sistemas Integrados de Fabricación” en el Máster Universitario de Ingeniería Industrial mediante el desarrollo de las siguientes actividades docentes en forma de prácticas:

- 1) **Introducción a los robots paralelos:** En esta práctica el modelo didáctico del robot paralelo permitirá a los estudiantes identificar de primera mano los grados de libertad del robot y visualizar cualitativamente de forma directa los cambios en la posición de la plataforma móvil al modificar las diferentes coordenadas articulares (giros/desplazamientos de los pares cinemáticos). Así mismo, los estudiantes podrán visualizar las posiciones límite de los diferentes pares y ver cómo influyen éstas en el espacio de trabajo del robot. De este modo, el estudiante podrá comprender de una forma más intuitiva las especificaciones técnicas de este tipo de robots.



(a)



(b)

Fig. 8. Visualización de las posiciones límite del Robot Delta:
(a) Modelo virtual con Autodesk Inventor y (b) modelo didáctico.

- 2) **Resolución del problema de posición inverso (PPI):** Se plantea visualizar las configuraciones que representan la solución del problema inverso mediante diversas herramientas didácticas. En primer lugar, las ecuaciones que resuelven el PPI se implementarán en Mathematica para poder obtener la solución del PPI en diversas posiciones. Posteriormente, mediante el uso de los modelos virtuales de los robots paralelos diseñados con Inventor, los estudiantes podrán simular el movimiento del robot moviendo cada uno de los pares cinemáticos de acuerdo con los valores obtenidos con las ecuaciones teóricas, comprobando que el robot se mantiene siempre dentro del espacio de trabajo (Fig. 8a).

Finalmente, los estudiantes utilizarán el modelo didáctico (Fig. 8b) para comprobar la posición y orientación alcanzada para diferentes valores de las coordenadas articulares comparando los resultados con los obtenidos analíticamente y con los de la simulación realizada con Inventor (Fig. 8a). Por último, se plantea que los estudiantes divididos en grupos, diseñen una trayectoria utilizando las diversas herramientas didácticas

desarrolladas. De este modo, cada estudiante analizará una posición/orientación y, posteriormente, los miembros de cada grupo pondrán en común los resultados individuales para analizar de forma conjunta una trayectoria. Con ello se pretende estimular el aprendizaje colaborativo entre estudiantes.

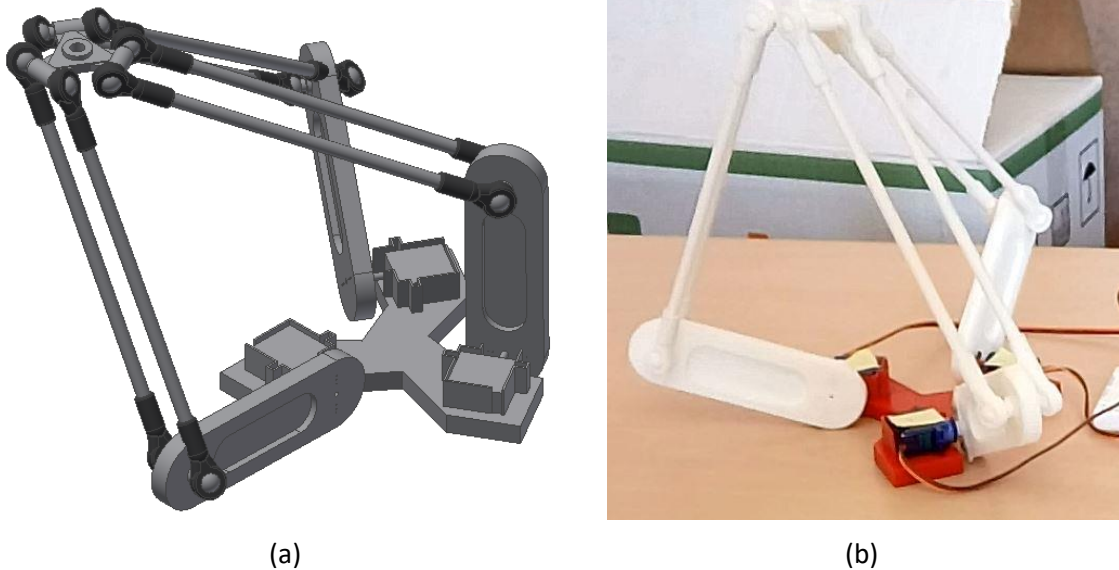


Fig. 8. Resolución del PPI: (a) simulación con Autodesk Inventor, (b) modelo didáctico.

3) Trabajo propuesto: En esta actividad se plantea que los estudiantes, de forma voluntaria, desarrollen todas las etapas del diseño y creación de un modelo a escala de un robot industrial mediante la impresión 3D, desde la búsqueda de información, pasando por el diseño de las piezas y ensamblaje con Autodesk Inventor, hasta la obtención de las ecuaciones cinemáticas aplicando los métodos analíticos para, finalmente, crear el modelo del robot mediante la impresión 3D de las piezas. En esta práctica el modelo didáctico construido servirá de ejemplo en las diversas etapas del proceso. De esta forma se favorecerá el aprendizaje basado en problemas.

Fase VIII) Puesta en marcha de las prácticas y actividades docentes en las asignaturas relacionadas con la Mecánica de Robots en las titulaciones de Grado en Ingeniería Mecánica y Máster Universitario de Ingeniería Industrial.

Fase IX) Cuantificar la mejora del aprendizaje conseguida con la realización de las actividades docentes desarrolladas en la fase VIII introduciendo nuevos sistemas de evaluación.

Fase X) Realizar encuestas de satisfacción de los estudiantes.

En la actualidad no se han podido llevar a cabo las tres últimas fases del proyecto debido a que la docencia de las asignaturas en las que está previsto aplicar las prácticas diseñadas se imparten durante el primer cuatrimestre. Por este motivo las tres últimas fases del proyecto se realizarán durante el primer semestre del curso 2018-2019.

2.2. Proceso de evaluación

Un cambio en la metodología docente conlleva un cambio en el sistema de evaluación. Se plantean las siguientes medidas para evaluar la adquisición de competencias:

- 1) Los estudiantes deberán realizar un informe evaluable de las prácticas 1 y 2 donde responderán a una serie de cuestiones planteadas por el profesor relacionadas con las diversas actividades previstas. Además, los estudiantes deberán discutir los resultados obtenidos de forma individual y poner en común los resultados de su grupo.
- 2) Trabajos propuestos: Se valorará especialmente la dificultad que supone el diseño y creación del robot y la profundidad de la discusión de los resultados obtenidos. El estudiante realizará, uno de los últimos días de clase, una breve presentación de su trabajo al resto de los estudiantes y se abrirá un turno de preguntas en el que podrá debatir con sus compañeros los resultados del trabajo presentado. Tanto la calidad del trabajo como la calidad de la presentación serán evaluables.
- 3) Realización de encuestas a los estudiantes para conocer su grado de satisfacción y poder estimar el tiempo empleado en la realización de las prácticas con el fin de ajustar las horas de trabajo del estudiante a los créditos ECTS de la asignatura.

3. Resultados

Los resultados previstos en el aprendizaje de los estudiantes de la aplicación de las actividades desarrolladas en este proyecto son:

- Mejorar la visualización y comprensión de la posición de la plataforma móvil en robots paralelos al modificar las variables articulares mediante el uso del modelo didáctico del robot Delta.
- Mejorar la visualización de las posiciones límite y del espacio de trabajo de un robot paralelo.
- Facilitar la visualizar las diversas configuraciones que surgen al resolver el PPI.
- Mejorar la visualización de las trayectorias del elemento terminal en un proceso de fabricación.
- Poner en práctica los conocimientos adquiridos en las clases teóricas.
- Facilitar al estudiante el proceso de aprendizaje y fomentar el autoaprendizaje, el aprendizaje colaborativo y el aprendizaje basado en problemas mediante la realización de las diversas actividades propuestas.
- Sumergir directamente a los estudiantes en un problema aplicado de ingeniería industrial.
- Mejorar la tasa de rendimiento
- Aumentar la motivación de los estudiantes en el seguimiento de la asignatura.

4. Conclusiones

Dentro del nuevo marco común europeo de la educación superior (EEES), se han desarrollado una serie de prácticas aplicadas a la enseñanza de las asignaturas “Mecánica de Robots” y “Sistemas Integrados de Fabricación”. El fin último de las actividades propuestas tiene por objetivo ayudar al estudiante a superar los problemas que tradicionalmente han estado asociados con el aprendizaje en dichas asignaturas relacionados con la visualización espacial de los robots.

Como resultado se espera que aumente la motivación del estudiante, su participación activa, su interés por los contenidos de la asignatura y, consecuentemente, mejore su proceso de aprendizaje. De igual forma, se espera que los nuevos criterios establecidos en la evaluación continua faciliten la adquisición de competencias con un incremento en la tasa de éxito.